

DEUTSCHES  PATENTAMT

## AUSLEGESCHRIFT 1 051 521

B 32679 IX/42 <sup>h</sup>

ANMELDETAG: 21. SEPTEMBER 1954

BEKANNTMACHUNG  
DER ANMELDUNG  
UND AUSGABE DER  
AUSLEGESCHRIFT:

26. FEBRUAR 1959

1

Die Erfindung betrifft eine Anordnung zur kapazitiven Bestimmung kleiner Lageänderungen eines Körpers im Raum, bei der der Körper mit mehreren je einer Raumkoordinate zugeordneten kapazitiven Spannungsteilern so gekoppelt ist, daß die zwischen je zwei festen Platten bewegliche dritte Platte eines jeden Spannungsteilers der Bewegungskomponente des Körpers in Richtung der betreffenden Koordinatenachse entsprechende Bewegungen ausführt.

Die erfindungsgemäße Anordnung ist in erster Linie zur Ermittlung und Sichtbarmachung kleiner räumlicher Bewegungen von Körpern, wie z. B. von Schwingungen oder Stößen sowie von Exzentrizitäten einer umlaufenden Welle bestimmt. Die Erfindung hat ferner den Vorzug, daß sich die periodischen Lageänderungen des Körpers im Raum auf dem Schirm eines Kathodenstrahl-Oszillographen anschaulich darstellen lassen.

Die Erfindung macht von dem Prinzip der bekannten kapazitiven Spannungsteiler Gebrauch. Es sind kapazitative Sender, z. B. auch in Form kapazitiver Spannungsteiler, bekannt, die zur Bestimmung kleiner und kleinster Verschiebungen geeignet sind. Dabei ist der Körper, dessen Lageveränderung festgestellt werden soll, mit einer beweglichen Platte des kapazitiven Senders so verbunden, daß bei einer Lageveränderung des Körpers die Kapazität des Senders oder ein Verhältnis zweier Kapazitäten verändert wird.

Die vorbekannten Verfahren und Einrichtungen zur Messung kleiner Lageänderungen eines Körpers auf kapazitivem Wege gestatten aber nur die Bestimmung einer in einer ganz bestimmten Richtung erfolgenden Lageänderung oder Komponente einer Lageänderung. Mit den bekannten Anordnungen kann man daher die Lageänderungen nur in einer Dimension ermitteln.

Um die der Erfindung zugrunde liegende Aufgabe, nämlich eine Lageänderung des Körpers beliebiger Richtung im Raum, quantitativ festzustellen, muß die Lage des Körpers in jedem Augenblick nach allen drei Raumkoordinaten bekannt sein. Zu diesem Zweck wären also drei kapazitative Sender erforderlich, die je einer Raumkoordinate zugeordnet werden müssen.

An und für sich könnte man daran denken, die bekannten kapazitiven Sender auch für die Bestimmung der Lageänderung des Körpers im Raum anzuwenden, indem man drei der bekannten kapazitiven Sender, d. h. für jede Raumkoordinate je einen Sender, benutzt. Die Verwirklichung dieses Gedankens und die praktische Lösung der Aufgabe in dieser Weise würde aber auf außerordentlich große Schwierigkeiten stoßen. Es bereitet nämlich große Umstände, die Verschiebungen in den drei Dimensionen durch die kapazitiven Sender sauber voneinander zu tren-

## Anordnung zur kapazitiven Bestimmung kleiner Lageänderungen eines Körpers im Raum

Anmelder:

Pierre Buisson, Vanves,  
Seine (Frankreich)

Vertreter: Dipl.-Ing. R. Müller-Börner, Patentanwalt,  
Berlin-Dahlem, Podbielskiallee 68

Beanspruchte Priorität:  
Frankreich vom 22. September 1953

Pierre Buisson, Vanves, Seine (Frankreich),  
ist als Erfinder genannt worden

2

nen und einwandfreie Meßergebnisse oder Anzeigen zu erzielen. Der Körper, dessen Lageänderungen im Raum zu bestimmen sind, müßte mit den beweglichen Platten dreier Kondensatoren, nämlich der drei den räumlichen Koordinatenachsen zugeordneten kapazitiven Sendern starr gekoppelt werden. Das würde aber eine außerordentliche komplizierte und unzuweckmäßige Einrichtung ergeben.

Die Erfindung geht daher auch einen anderen Weg und macht nicht von den bisher bekannten kapazitiven Sendern oder Spannungsteilern zur Bestimmung der Lageänderungen eines Körpers im Raum Gebrauch. Auch bei der erfindungsgemäßen Anordnung ist zwar der Körper so mit drei den Raumkoordinaten zugeordneten kapazitiven Spannungsteilern gekoppelt, daß die zwischen je zwei festen Platten bewegliche dritte Platte eines jeden der drei Spannungsteiler der Bewegungskomponente des Körpers in Richtung der betreffenden Koordinatenachse entsprechende Bewegungen ausführt. Die Erfindung besteht nun aber darin, daß der Körper mit seiner leitenden Oberfläche unmittelbar die beweglichen Platten aller kapazitiven Spannungsteiler bildet, indem er zwischen den Paaren feststehender und zu der gegenüberliegenden Oberfläche des Körpers parallelen Kondensatorplatten der Spannungsteiler angeordnet ist.

Die Erfindung schlägt also im Gegensatz zu allen bisher bekannten Anordnungen vor, den Körper so

auszubilden, daß seine Oberfläche unmittelbar als eine in Richtung der drei Koordinatenachsen verschiebbare Elektrode ausgebildet ist. Diese verschiebbare Elektrode ist zwischen drei Paaren feststehender Kondensatorplatten angeordnet, wobei zwischen jedem feststehenden Plattenpaar in bekannter Weise eine konstante Wechselspannung liegt. Die Frequenz der Wechselspannungen an den drei festen Plattenpaaren wird zweckmäßigerweise unterschiedlich gewählt. Die Meßspannungen, die die räumliche Verschiebung in Richtung der drei Koordinatenachsen angeben, werden an der Oberfläche des Körpers, also an der gemeinsamen beweglichen Elektrode einerseits und andererseits an je einer Platte der drei festen Plattenpaare, abgenommen. Die Spannung zwischen der von dem Körper gebildeten beweglichen Elektrode und einer Platte eines festen Plattenpaares hängt von dem Abstand der beweglichen Elektrode, also von der Körperoberfläche von der festen Kondensatorplatte, ab.

Dagegen ist der absolute kapazitive Wert zwischen der beweglichen Elektrode einerseits und den festen Kondensatorplatten andererseits für das Spannungsteilungsverhältnis nicht maßgebend, so daß eine Verschiebung des Körpers parallel zu einem festen Plattenpaar keine Änderung der Meßspannung gegenüber diesem festen Plattenpaar hervorruft.

Ein wesentlicher Vorzug der Erfindung ist darin zu erblicken, daß der Körper, dessen Verschiebung in den drei Koordinatenachsen bestimmt werden soll, nicht mit beweglichen Kondensatorplatten mechanisch gekoppelt werden muß, sondern für alle drei kapazitiven Spannungsteiler die beweglichen Kondensatorplatten unmittelbar darstellt. Dabei ergibt sich die Möglichkeit, den Körper bzw. dessen leitende Oberfläche zu erden.

Die erfindungsgemäße Anordnung läßt sich grundsätzlich auf Körper aller Formen anwenden. Besonders einfache Verhältnisse ergeben sich bei einem quader- oder würfelförmigen Körper mit leitender Oberfläche, da hier jeder der sechs Seiten des Körpers eine ebene und feststehende Kondensatorplatte parallel gegenüberliegt und die sechs feststehenden Kondensatorplatten zusammen mit dem Körper drei kapazitative Spannungsteiler bilden.

Aber auch wenn der Körper ein geschlossener Zylinder mit leitender Oberfläche, z. B. auch eine umlaufende Welle, ist, kann die Erfindung mit Vorteil benutzt werden. Für diesen Fall ist es zweckmäßig, daß der Mantel des Körpers von zwei Paaren feststehender kreissektorförmiger Kondensatorplatten konzentrisch so umgeben ist, daß sich die Platten eines jeden Paares diametral gegenüberliegen und die Achsen beider Paare senkrecht aufeinander stehen, während ein drittes Paar feststehender Kondensatorplatten aus je einer jeder Endfläche des Körpers parallel gegenüberliegenden ebenen Scheibe gebildet wird.

Mit der erfindungsgemäßen Anordnung lassen sich Ungenauigkeiten, ungenaue Lagerungen und Exzentrizitäten einer umlaufenden Welle bequem feststellen und anschaulich wiedergeben. Für die optische Anzeige der mit der erfindungsgemäßen Anordnung festgestellten Lageänderungen des Körpers ist ein Kathodenstrahl-Oszillograph, der zwei Ablenkplattenpaare hat, besonders gut geeignet, da er ein anschauliches Bild von den periodischen Lageänderungen gibt.

Um die Lageänderungen des Körpers nach allen drei Koordinatenachsen, d. h. die Meßspannungen aller drei kapazitiven Spannungsteiler bei der optischen Anzeige durch den Kathodenstrahl-Oszillographen zu berücksichtigen, geht man am besten so vor, daß die

drei Paare feststehender Kondensatorplatten an dem Eingang je eines Verstärkers liegen und der Ausgang des einen Verstärkers unmittelbar mit dem einen Paar Ablenkplatten und die Ausgänge des zweiten und dritten Verstärkers mit dem zweiten Paar Ablenkplatten über eine Schaltung verbunden sind, die die Ausgangsspannung des zweiten Verstärkers mit dem Sinus eines beliebigen Winkels und die Ausgangsspannung des dritten Verstärkers mit dem Kosinus des gleichen Winkels multipliziert.

Ein besonderer Vorteil der erfindungsgemäßen Anordnung besteht darin, daß der Körper, dessen Lageänderungen festgestellt werden sollen, überhaupt nicht in mechanischer Hinsicht beeinflußt wird, daß keine seine Trägheit erhöhenden oder eine Reibung bewirkenden Kopplungsmittel mechanischer Art vorgesehen werden müssen. Der Körper wird in seiner Bewegungsfreiheit nicht im geringsten beeinträchtigt und steht mit keinem Teil der eigentlichen Meßanordnung in Verbindung.

Weitere Einzelheiten und Vorteile der erfindungsgemäßen Anordnung gehen aus den nachstehend beschriebenen Ausführungsbeispielen der Erfindung hervor, die in der Zeichnung dargestellt sind. Es zeigt

Fig. 1 das vereinfachte Schema der Messung von Lageänderungen in bezug auf drei Achsen  $OX$ ,  $OY$ ,  $OZ$  mittels dreier kapazitiver Spannungsteiler,

Fig. 2 eine Ausführungsform der erfindungsgemäßen Anordnung, in der der Körper ein Würfel ist,

Fig. 2A eine Ausführung mit offenem, »schwimmendem« Lager,

Fig. 3 eine Ausführungsform der Anordnung für die Messung von Verschiebungen eines zylindrischen Körpers, z. B. einer rotierenden Welle,

Fig. 4 die elektrische Schaltung der Kondensatorplatten eines Spannungsteilers der in Fig. 3 gezeigten Anordnung,

Fig. 5 eine schematische Anordnung der Kombination der in Fig. 3 gezeigten Vorrichtung für die Messung von Verschiebungen in bezug auf die beiden rechtwinklig zur Welle stehenden Achsen  $OY$ ,  $OZ$  mit einem als Anzeiger verwendeten Kathodenstrahl-Oszillographen,

Fig. 6 eine schematische Anordnung des Schaltschemas für die Vorrichtung von Fig. 3 unter Verwendung eines Kathodenstrahl-Oszillographen für die sichtbare Darstellung der Verschiebung der rotierenden Welle in drei Dimensionen,

Fig. 7 das Aussehen der einer gewissen Verschiebung im Raum der rotierenden Welle entsprechenden Kurven,

Fig. 8 eine schematische Ansicht einer Schaltung, die die Orientierung der zu beobachtenden, auf dem Oszillographenschirm gezogenen Kurve in bezug auf einen physikalischen Punkt der rotierenden Welle ermöglicht,

Fig. 9 ein allgemeines Schaltschema, das die Anwendung der Vorrichtung von Fig. 2 für die sichtbare Anzeige und Bestimmung der Verschiebungen eines Körpers in einem Koordinatensystem mit drei Achsen entsprechend den drei Dimensionen im Raume zeigt, und

Fig. 10 eine schematische Anordnung eines fernerhin möglichen Verfahrens zum Messen von Verschiebungen durch Kompensation nach dem Nullverfahren.

Fig. 1 zeigt schematisch ein Verfahren für die Messung von Verschiebungen eines Punktes 0 im Raume mittels eines elektronischen Meßgerätes mit drei Doppelkapazitäten. Drei die Achsen  $OX$ ,  $OY$  und  $OZ$  bildende Stangen sind starr mit dem Punkt 0 gekop-

pelt, dessen Verschiebung gemessen werden soll, wodurch sie ein starres System in Form eines dreifach rechteckigen Dreifächers bilden. Auf jeder dieser Achsen und rechtwinklig dazu ist je eine bewegliche Elektrode 1, 1', 1'' befestigt, welche sich zwischen den festen Elektroden 2, 3; 2', 3'; 2'', 3'' bewegen können und so drei Koppelkondensatoren bilden. Es ist zu bemerken, daß die Ablesungen, die von den Meßgeräten wiedergegeben werden, von dem Verhältnis der Kapazitäten, wie 1-2 und 1-3, abhängig sind und daß dieses Verhältnis nicht durch das Gleiten der beweglichen Elektrode 1 in Richtung der beiden anderen Achsen OY und OZ beeinträchtigt wird, so daß die Messungen der Verschiebungen in bezug auf die drei Achsen völlig unabhängig voneinander sind, vorausgesetzt, daß keine Drehung stattfinden kann.

Fig. 2 zeigt eine Ausführungsform eines Dreifachmeßgerätes, welches sich für die Messung von Schwingungen mechanischer Teile, z. B. von Maschinengestellen, eignet, wo Drehungen außer acht gelassen werden können. Ein Würfel oder ein rechtwinkliges Parallelipedon 4 ist elastisch in einem aus drei Paaren fester Platten 2, 3; 2', 3'; 2'', 3'' gebildeten Gehäuse angebracht, wobei diese festen Platten mechanisch miteinander gekoppelt und an dem zu messenden Maschinengestell befestigt, jedoch elektrisch voneinander abisoliert sind. Der feste, zentral gelegene Körper, welcher die gemeinsame Elektrode bildet, ist durch einen biegsamen Draht mit »Erde« verbunden, wobei ein notwendiger und ausreichender dielektrischer Raum zwischen der gemeinsamen Elektrode und den Außenplatten vorgesehen ist.

Es ist klar, daß die festen Platten nicht eine der gesamten Oberfläche des Parallelipedons entsprechende Fläche haben müssen und, falls notwendig, mit Zwischenraum für den Zutritt zur zentralen Elektrode, wenn diese beispielsweise als Lager verwendet wird, versehen sein können. Die gegenseitigen Anordnungen der verschiedenen Teile können in je nach den Erfordernissen für die Anbringung und des beanspruchten Raumes geändert werden. Beispielsweise wird in Fig. 2A ein aufklappbares Lager 30, welches auf einer Grundplatte 31 mittels vier federnder Supporte 32 ruht, für Messungen in einer Ebene verwendet. Die Elektroden 3', 2' für die Achse OX sind in genau der gleichen Weise wie die in Fig. 1 gezeigten angeordnet, wobei die Platte 1' starr mit dem Lager 30 gekoppelt ist, während die Elektroden 3'', 2'' für die Achse OZ gemäß Fig. 2 angeordnet sind.

Fig. 3 veranschaulicht eine weitere Ausführungsform eines Dreifachmeßgerätes für die Messung von Verschiebungen einer rotierenden Welle 6. Diese Welle kann sich entlang den Achsen OY, OZ unter der Wirkung von Biegekräften oder dynamischen Kräften bewegen, welche aus einem Ungleichgewicht entstehen; außerdem kann sie entlang der Achse OX schwingen. In dieser Ausführungsform wird die gemeinsame bewegliche Elektrode des Dreifachmeßgerätes durch einen auf der Welle 6 verkeilten Zylinders 7 gebildet. Der Außenumfang des Zylinders 7 wird von zwei Plattenpaaren 2', 3'; 2'', 3'' umgeben, von denen jede Platte eine gebogene Form hat, so daß sie parallel zu dem Außenumfang des Zylinders liegt, wobei die Platten jeweils rechtwinklig zu der Achse OY, OZ liegen. Jedes dieser Plattenpaare bildet mit dem Zylinder 7 einen Doppelkondensator. Wenn die Platten ausreichend schmal sind und der dielektrische Zwischenraum angemessen ist, so kann die Wirkung der Plattenkrümmung und der zylindrischen Oberfläche außer acht gelassen werden, und die Erfahrung hat gezeigt,

daß, wenn der Zylinder 7 senkrecht zu seiner Achse OX bewegt wird, sich die beiden durch den Zylinder 7 und die Platten 2', 3' bzw. durch den Zylinder 7 und die Platten 2'', 3'' gebildeten Meßgeräte genau wie Meßgeräte mit ebenen Platten verhalten. Für die Messung von Verschiebungen in bezug auf die Achse OX werden die Scheiben 2, 3 als feststehende Elektroden verwendet, die die Welle umgeben und die mit den beiden den Zylinder 7 an seinen beiden Enden schließenden geraden Flächen zusammenwirken. Das so erzielte Meß- und/oder Anzeigesystem ist völlig ohne Reibung und ermöglicht die fehlerlose Messung von Verschiebungen der Welle, die von dynamischen Kräften herrühren können. Die zentral gelegene Elektrode kann durch die Welle selbst gebildet werden, deren Exzentrizität bei niedrigen Geschwindigkeiten gemessen werden kann, was ein wichtiger Fehler ist, der zu oft übersehen wird.

Fig. 4 ist eine schematische Veranschaulichung der Schaltung der Platten eines der drei im vorgehenden System erwähnten Kondensatoren, d. h. des die Messung der vertikalen Verschiebung entlang der Achse OZ ermöglichenden Meßgerätes. Die festen Platten 2'', 3'' sind in A bzw. B mit den Klemmen einer Induktionsspule 11 verbunden, die bei 11' mit einem einen Hochfrequenzstrom liefernden Oszillator gekoppelt ist. Mit diesen beiden Klemmen sind zwei reihengeschaltete Kondensatoren 12 und 13 verbunden. Der Zylinder 7 ist in D geerdet; er bildet mit den festen Platten 2'', 3'' zwei Kondensatoren, welche mit den beiden Kondensatoren 12 und 13 einen doppelten Spannungsteiler nach Art einer Wheatstoneschen Brücke bilden, die so eingestellt ist, daß sie sich innerhalb des Meßbereiches immer im Ungleichgewicht befindet. Jede Verschiebung der Welle 6 entlang der Achse OZ verursacht eine Schwankung der dem Eingang des Verstärkermeßgeräts V zugeführten Spannung und ergibt ein Maß für die Verschiebung, das unabhängig von dem Rotieren der Welle ist.

Fig. 5 zeigt schematisch, wie eine sichtbare Wiedergabe der Schwingungen einer rotierenden Welle 6 in bezug auf die rechtwinklig zu ihrer Achse OX stehenden Achsen OY und OZ, mittels der oben beschriebenen Vorrichtung und eines Kathodenstrahl-Oszillographen erzielt werden kann. Der Zylinder 7 ist ständig geerdet; die festen Platten 2'', 3'', welche zur Messung der horizontalen Verschiebung entlang der senkrecht zur Achse OX stehenden Achse OY dienen, sind mit der Meßvorrichtung 14' verbunden, die aus dem Oszillator und der Meßbrücke sowie einem Verstärker besteht und an ihren Ausgangsklemmen eine Spannung entsprechend der Verschiebung der Welle 6 entlang der Achse OY liefert. Diese Spannung wird den horizontalen Ablenkplatten 15', 16' eines Kathodenstrahl-Oszillographen zugeführt. In ähnlicher Weise sind die Platten 2'', 3'', welche die Verschiebung entlang der Achse OZ messen, mit der Gruppe 14'' ähnlich der 14' verbunden, die an ihrem Ausgang eine Gleichspannung entsprechend der Verschiebung der Welle 6 entlang der Achse OZ liefert, die den vertikalen Ablenkungsplatten 15'', 16'' eines Kathodenstrahl-Oszillographen zugeführt wird. Die Tatsache, daß der Leuchtpunkt der Verschiebung der Welle folgt, kann, wenn die Welle 6 sich in Ruhe befindet und eine gewisse Biegsamkeit besitzt, durch Druck mit den Fingern auf die Welle geprüft werden. Diese Bewegung entspricht der momentanen Verschiebung und kann geeicht werden, wenn die Welle in Ruhe ist. Wenn die Welle beim Drehen vibriert, so wird der Leuchtpunkt den Bewegungen der Welle folgen und eine Kurve schreiben,

die bequem auf einem Schirm mäßiger Nachleuchtdauer beobachtet werden kann, auch bei niedrigen Drehgeschwindigkeiten. Bei gleichbleibenden Geschwindigkeiten sind die Schwingungen der Welle gewöhnlich periodisch, und der Leuchtpunkt zeichnet eine geschlossene, feststehende Kurve, die eine dynamische Prüfung der Maschine ermöglicht, wobei z. B. ein Ungleichgewicht oder ein Wuchtfehler aufgedeckt werden kann. Um die Orientierung der Kurve in bezug auf die Welle, z. B. zum Bestimmen der Richtung eines Ungleichgewichtes, zu ermöglichen, kann die Anlage nach Fig. 8 vervollständigt werden. Ein Nocken 18 kann auf der Welle 6 angebracht sein, wobei der Nocken eine Nase 19 hat, die bei jeder Umdrehung einen Kontakt 20 schließt. Dieser Kontakt kann auf den Wehneltzylinder des Oszillographen einwirken und die Helligkeit des Leuchtpunktes steigern, so daß bei jeder Umdrehung in der Kurve je nach der Stellung der Nase des Nockens 18 auf der Welle 6 ein hellerer Punkt 21 (Fig. 5) sichtbar wird.

Infolge der Wirkung der schädlichen Kapazitäten zwischen den festen Elektroden 2', 3' und 2'', 3'' besteht die Möglichkeit der Entstehung von Überlagerungsfrequenzen zwischen den beiden Kanälen. Um dies zu vermeiden, müssen die Frequenzen der Oszillatoren unterschiedlich gewählt werden, oder es muß umgekehrt ein gemeinsamer Oszillator für beide Kanäle 14' und 14'' verwendet werden.

Wenn zusätzlich zu den Vibrationen der Welle 6 die Messung ihrer Gleitbewegung in bezug auf die Achse  $OX$  erwünscht ist, so wird ein zusätzliches Meßgerät (Fig. 6) benutzt, welches aus den festen Elektroden 2, 3, die mit den Seitenflächen 9, 10 des Zylinders 7 oder mit einem auf der Welle 6 gebildeten angesetzten Stück zusammenwirken, besteht. Dieses System ist mit einer Gruppe 14 ähnlich den Gruppen 14' und 14'' von Fig. 5 verbunden, die an ihren Ausgangsklemmen eine der Verschiebung entlang der Achse  $OX$  proportionale Spannung liefert, die getrennt abgelesen werden könnte. Zum Zwecke einer Analyse ist es jedoch von Interesse zu wissen, welche Beziehung zwischen den Amplituden und der Phase der Schleife in Richtung der Achse  $OX$  und den Verschiebungen entlang den Achsen  $OX$  und  $OZ$  besteht.

In einer vorzugsweisen Ausführungsform der vorliegenden Erfindung kann aber ein einziger Oszillograph verwendet werden, um eine sichtbare Darstellung der Verschiebungen der Welle im Raum in bezug auf die Achsen  $OX$ ,  $OY$ ,  $OZ$  wiederzugeben, wobei die Darstellung in einer Ebene ablesbar sein kann. Dies läßt sich durch Verwendung der in Fig. 6 gezeigten Anordnung erreichen. In dieser Anordnung ist ersichtlich, daß die Platten 2', 3' über die Gruppe 14', wie oben angegeben, auf die vertikalen Ablenkplatten 15', 16' des Kathodenstrahl-Oszillographen wirken. Den horizontalen Ablenkplatten 15'', 16'' wird eine Spannung zugeführt, die gleich der Summe der Ausgangsspannung von 14'' multipliziert mit dem Kosinus eines willkürlichen Winkels  $\alpha$  und der Ausgangsspannung der Gruppe 14 multipliziert mit dem Sinus desselben Winkels ist. Die Multiplikation erfolgt einfach durch Einwirkung auf die Verstärkung der Gruppen 14 und 14''; die Addition der beiden Potentiale kann mittels eines Doppel-Sinus-Kosinus-Potentiometers 22 erfolgen, das auch durch zwei lineare, mechanisch nach einer Sinus- und Kosinus-Verstellung betätigte Potentiometer verwirklicht werden kann.

Fig. 7 zeigt das Aussehen der mit diesem System erzielten Kurven. Es ist angenommen, daß der Mittel-

punkt 30 der Welle an der Stelle, an der die Messung vorgenommen wird, eine kreisende Bewegung um die wirkliche Umwälzachse in der Ebene  $OY$ ,  $OZ$  beschreibt und zusätzlich entlang der Achse  $OX$  gleitet.

Wenn zunächst die Messung der Verschiebung entlang  $OX$  außer acht gelassen wird (indem die Verstärkung in der Gruppe 14 auf Null herabgesetzt wird), so ergeben sich die Kurven  $A$ ,  $B$ ,  $C$ ,  $D$  durch Veränderung der Verstärkung der Gruppe 14''. Wenn die durch 14'' gelieferte Verstärkung gleich der von 14' gelieferten ist, so wird in  $A$  ein Kreis erzielt werden, genau wie es bei der Schaltung von Fig. 5 der Fall war. Wenn die Verstärkung herabgesetzt wird, wird die beobachtete Kurve eine Ellipse, die sich allmählich mehr und mehr abflacht, genau so, als wenn man die Welle längs einer Linie, die mit der wirklichen Umwälzachse einen Winkel  $\alpha$  bildet, erblicken würde, sofern die Verschiebung in der Ebene  $OY$ ,  $OZ$  genügend groß ist, um für das bloße Auge sichtbar zu sein. Wenn die Verstärkung von 14'' gleich Null ist, was einer Beobachtung längs der Achse  $OY$  entspricht, so wird die Kurve auf eine gerade Linie  $D$  reduziert. Wenn nun zu der Ausgangsspannung von 14'' die Ausgangsspannung der Gruppe 14 entsprechend der Verschiebung entlang  $OX$  multipliziert mit dem Sinus des Winkels hinzugefügt wird, so werden aus den Kurven  $A$ ,  $B$ ,  $C$ ,  $D$  die Kurven  $H$ ,  $G$ ,  $F$ ,  $E$ , welche der Bahn des im Raum aus einem Winkel  $\alpha$  gesehenen Punktes 30 entsprechen. Dieses Verfahren liefert eine gute visuelle Darstellung der Erscheinung. Für eine zahlenmäßige Auswertung sind vorzugsweise die Kurven  $H$  und  $E$  zu benutzen, von denen die erste die beiden Verschiebungen in bezug auf  $OY$  und  $OZ$  und die zweite die Verschiebungen in bezug auf  $OX$  und  $OZ$  wiedergeben.

Die in Fig. 9 gezeigte Ausführungsform ist eine erweiterte Form des in Fig. 6 gezeigten schematischen Systems, das jedoch in diesem Falle die Bauart der in Fig. 2 gezeigten Doppelkondensatorvorrichtung enthält. Jeder der drei Doppelkondensatoren 2, 4, 3; 2', 4, 3'; 2'', 4, 3'' wird mit Wechselstrom, vorzugsweise mit Hochfrequenz, über Induktionsspulen 23, 23', 23'' gespeist, die mit den mit einem Hochfrequenzgenerator  $H$ ,  $F$  verbundenen Induktionsspulen 24, 24', 24'' gekoppelt sind. Es können jedoch in den drei Kanälen verschiedene Frequenzen verwendet werden. Die gemeinsamen Punkte der Reihenkondensatorpaare 12, 13', 12' 13'; 12'', 13'' sind mit den Einheiten  $V$ ,  $V'$ ,  $V''$  verbunden, die je einen ein- und mehrstufigen Hochfrequenzverstärker, einen Gleichrichter, einen Gleichstromverstärker und ein Meßinstrument enthalten können.

Das mit den festen Elektroden 2', 3' in Verbindung stehende Gerät  $V'$  ist mit den vertikalen Ablenkplatten 15', 16' eines schematisch gezeigten Kathodenstrahl-Oszillographen  $CR$  verbunden. Die Ausgänge der Kanäle  $V$ ,  $V''$  werden vereinigt und an die horizontalen Ablenkplatten 15'', 16'' gelegt, wobei die Vereinigung dieser Ausgänge durch Potentiometer  $P$ ,  $P''$  erfolgt, deren Kontaktarme mit den Platten 15'', 16'' verbunden sind.

Dadurch ist die zwischen den Platten 15'', 16'' vorhandene Spannung die Summe von zwei Spannungen, von denen eine die dem Kanal  $V$  entnommene Spannung multipliziert mit dem Kosinus eines willkürlichen Winkels  $\alpha$  von beispielsweise  $30^\circ$  ist, während die andere die dem Kanal  $V''$  entnommene Spannung multipliziert mit  $\sin \alpha$  ist. Auf diese Weise definiert die Lage des Leuchtpunktes  $S$  auf dem Schirm der Röhre  $CR$  die momentane Lage eines Punktes auf dem Körper 4 in bezug auf drei rechtwinklig zueinander

stehende Koordinatenachsen, die den drei Dimensionen im Raume entsprechen.

Fig. 10 veranschaulicht schematisch eine weitere Anwendungsmöglichkeit des Gerätes. Diese besteht darin, daß eine zylindrische Elektrode 7' synchron mit einem auszuwuchtenden Glied 7 rotiert, wobei die Elektrode 7, mechanisch ausgewuchtet wird, jedoch eine elektrostatische Asymmetrie aufweist, was leicht mittels eines exzentrisch auf der Welle 6' angebrachten Zylinders erreicht werden kann, wobei das das Ungleichgewicht hervorruftende Material durch Spanabhebung in üblicher Weise beseitigt wird.

Um die zylindrische Elektrode 7 herum sind vier mechanisch miteinander gekoppelte, jedoch elektrisch gegeneinander isolierte Elektroden 32', 33'; 32'', 33'' angebracht. Die Gruppe bildet eine Einrichtung ähnlich der vorher beschriebenen Meßvorrichtung.

Außerdem sind Mittel vorgesehen, um die vier zusätzlichen Elektroden entsprechend dem Pfeil F zu drehen und sie auch in axialer, durch den Pfeil F' angedeuteten Richtung zu verschieben, damit die aktive Fläche der Elektroden je nach dem gegenüber der zentral gelegenen Elektrode angebrachten Teil verändert werden kann. Es sind also somit wirksame Mittel vorhanden, um ein fiktives Ungleichgewicht zu schaffen, dessen Winkelstellung und absolute Größe beliebig nach einem bekannten Maßstab geändert werden können.

Wenn nun die beiden Meßvorrichtungen, von denen die eine das wirkliche Ungleichgewicht und die andere das fiktive Ungleichgewicht anzeigt, parallel geschaltet werden, so kann die algebraische Summe der Verschiebungen abgelesen werden, und diese Summe läßt sich dann durch Längs- und Seitenverstellung der zusätzlichen Elektroden auf Null bringen.

Es gibt auch ein genaues Verfahren, um die Winkelwerte und die Lage der Verschiebungen des auszuwuchtenden Teiles mittels des Nullverfahrens abzulesen. Die Nullablesung kann nicht nur mittels eines Oszillographen, wie oben angegeben, sondern auch durch Verwendung von üblichen Integrationsverfahren oder durch Gegenschaltung vorgenommen werden.

Beispielsweise erhält man durch getrenntes Integrieren der einerseits aus dem wirklichen Ungleichgewicht und andererseits aus dem fiktiven Ungleichgewicht resultierenden Wechselströme und dann durch Gleichmachen der Werte der beiden entsprechenden mittleren Ströme durch Längsverschiebung der Elektrode den Wert des Ungleichgewichtes großemäßig, jedoch nicht richtungsmäßig. Die beiden jetzt gleichen Wechselstromwerte werden jetzt ohne Integration in Gegenphase durch Drehen der Elektroden gebracht, was die Winkelstellung des Ungleichgewichtes ergibt.

Die Längs- und Kreisverschiebungen können automatisch ausgeführt und durch Überschreitung des Gleichgewichtspunktes gesteuert werden, wobei die zwei erwähnten Messungen nach dem Nullverfahren ausgeführt werden.

Für die Achsen OX, OY, OZ können ein, zwei oder drei Kanäle verwendet werden, die entweder zusammengefaßt oder, wenn die Messungen in einer Ebene als ausreichend angesehen werden, getrennt sind. Unter Verwendung des gleichen Meßgerätes, jedoch mit Verbindung der gegenüberliegenden äußeren Elektroden kann auch die Summe von zwei Kapazitäten an Stelle des Kapazitätsverhältnisses gemessen werden; auf diese Weise können auch die Schwankungen im Durchmesser eines rotierenden Gliedes, welches beispielsweise einer durch Zentrifugalkräfte verursachten Verformung unterliegt, oder eines gleitenden Gliedes,

welches einem inneren, beispielsweise durch die Verbrennung eines Pulvers, verursachten Druck unterliegt, ohne Berührung dieses Gliedes und mit verhältnismäßiger Unabhängigkeit von seiner Lage bestimmt werden.

Im Falle von Messungen an rotierenden Gliedern ermöglicht eine niedrige Drehgeschwindigkeit Exzentrizitätsmessungen bei Abwesenheit von dynamischen Kräften; diese Messung kann jedoch auch mit einem geringeren Genauigkeitsgrad durch Verwendung von nur einer der zwei Kapazitäten jeder Gruppe vorgenommen werden.

Das Fehlen mechanischer Trägheit und das schnelle Ansprechen der elektronischen Kreise ermöglicht genaue Ablesungen, auch wenn die Messung nur über einen Bruchteil einer Umdrehung vorgenommen wird.

Besonders wenn die bewegliche Elektrode ein rotierender Zylinder ist, kann deren äußere Oberfläche durchbrochen sein. Zum Beispiel können beim Rotor einer Turbine, wenn für die Unterbringung von vier Elektroden im Stator gesorgt ist, die vier Platten gegenüberstehen, so können das Spiel an den Spitzen der Platten, die Gleichmäßigkeit ihrer Abstände und ihre Exzentrizitäten sämtlich mit einer, zwei oder vier Elektroden, wie vorstehend angegeben, gemessen werden. Auch wenn der Rotor mit hoher Geschwindigkeit läuft, können die daraus sich ergebenden dynamischen Verformungen gemessen und/oder angezeigt werden.

#### PATENTANSPRÜCHE:

1. Anordnung zur kapazitativen Bestimmung kleiner Lageänderungen eines Körpers im Raum, bei der der Körper mit mehreren je einer Raumkoordinate zugeordneten kapazitativen Spannungsteilern so gekoppelt ist, daß die zwischen je zwei festen Platten bewegliche dritte Platte eines jeden Spannungsteilers der Bewegungskomponente des Körpers in Richtung der betreffenden Koordinatenachse entsprechende Bewegungen ausführt, dadurch gekennzeichnet, daß der Körper mit seiner leitenden Oberfläche unmittelbar die beweglichen Platten aller kapazitativer Spannungsteiler bildet, indem er zwischen den Paaren feststehender und zu der gegenüberliegenden Oberfläche des Körpers parallelen Kondensatorplatten der Spannungsteiler angeordnet ist.

2. Anordnung nach Anspruch 1 für einen quader- oder würfelförmigen Körper mit leitender Oberfläche, dadurch gekennzeichnet, daß jeder der sechs Seiten des Körpers eine ebene und feststehende Kondensatorplatte parallel gegenüberliegt und die sechs feststehenden Kondensatorplatten zusammen mit dem Körper drei kapazitative Spannungsteiler bilden (Fig. 2).

3. Anordnung nach Anspruch 1 für einen geschlossenen zylindrischen Körper mit leitender Oberfläche, dadurch gekennzeichnet, daß der Mantel des Körpers von zwei Paaren feststehender kreissektorförmiger Kondensatorplatten konzentrisch so umgeben ist, daß sich die Platten eines jeden Paares diametral gegenüberliegen und die Achsen beider Paare senkrecht aufeinander stehen, während ein drittes Paar feststehender Kondensatorplatten aus je einer jeder Endfläche des Körpers parallel gegenüberliegenden ebenen Scheibe gebildet wird (Fig. 3).

4. Anordnung nach einem der Ansprüche 1 bis 3, dadurch gekennzeichnet, daß jedes Paar feststehender Kondensatorplatten mit einer Wechsel-

spannungsquelle verbunden und die leitende Oberfläche des Körpers geerdet ist (Fig. 2 und 4).

5. Anordnung nach einem der Ansprüche 1 bis 4 mit einer optischen Anzeige der Lageänderungen des Körpers durch einen mit zwei Paaren Ablenkplatten ausgestatteten Kathodenstrahl-Oszillographen, dadurch gekennzeichnet, daß die drei Paare feststehender Kondensatorplatten an dem Eingang je eines Verstärkers liegen und der Ausgang des einen Verstärkers unmittelbar mit dem einen Paar Ablenkplatten und die Ausgänge des zweiten und dritten Verstärkers mit dem zweiten Paar Ablenkplatten über eine Schaltung verbunden sind, die die Ausgangsspannung des zweiten Verstärkers mit dem Sinus eines beliebigen Winkels und die Ausgangsspannung des dritten Verstärkers mit

dem Kosinus des gleichen Winkels multipliziert (Fig. 6).

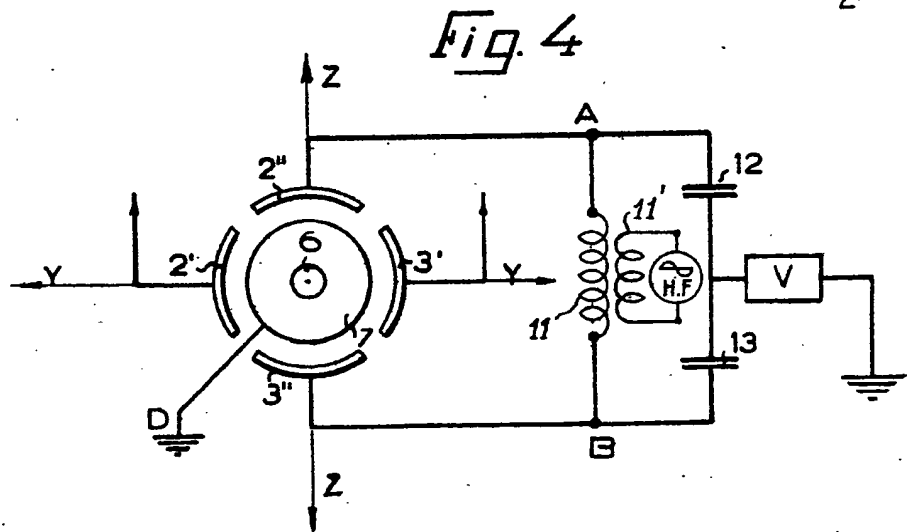
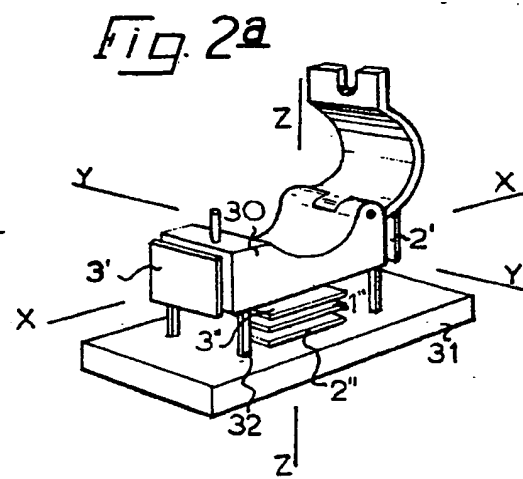
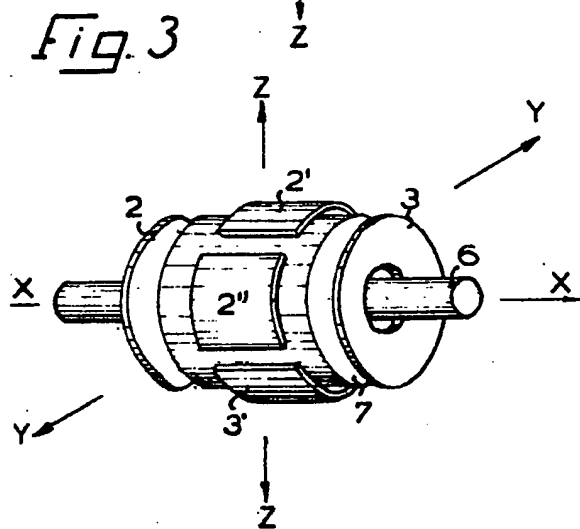
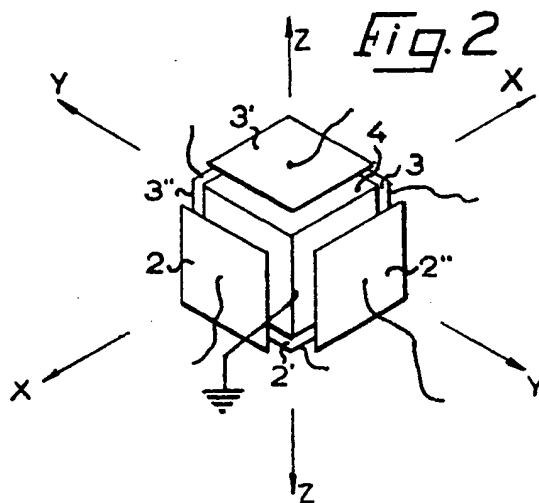
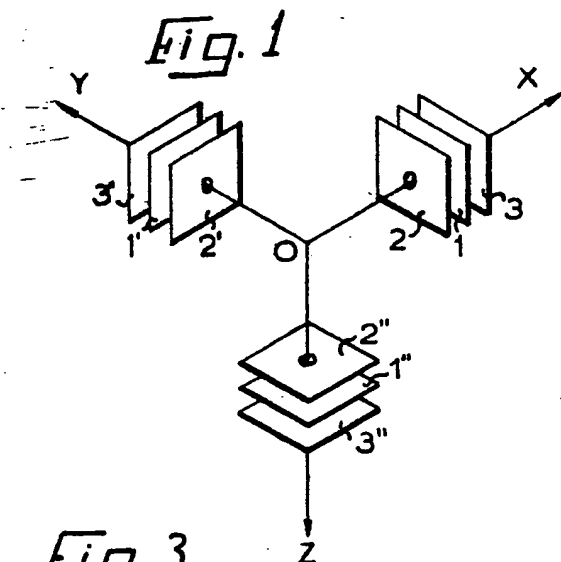
6. Anordnung nach Anspruch 5 für die optische Anzeige der Lageänderungen einer Welle, gekennzeichnet durch einen auf der Welle befestigten Nocken, der bei jedem Umlauf der Welle einmal einen elektrischen Kontakt kurzzeitig schließt und dadurch die Helligkeit des Leuchtfleckes des Kathodenstrahl-Oszillographen kurzzeitig erhöht (Fig. 8).

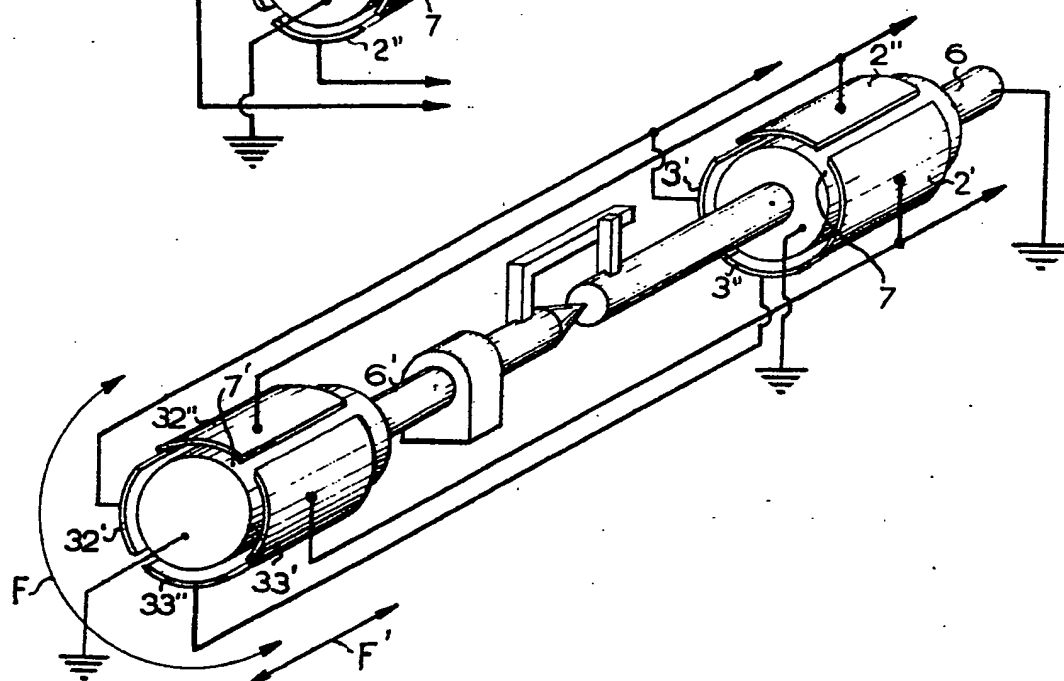
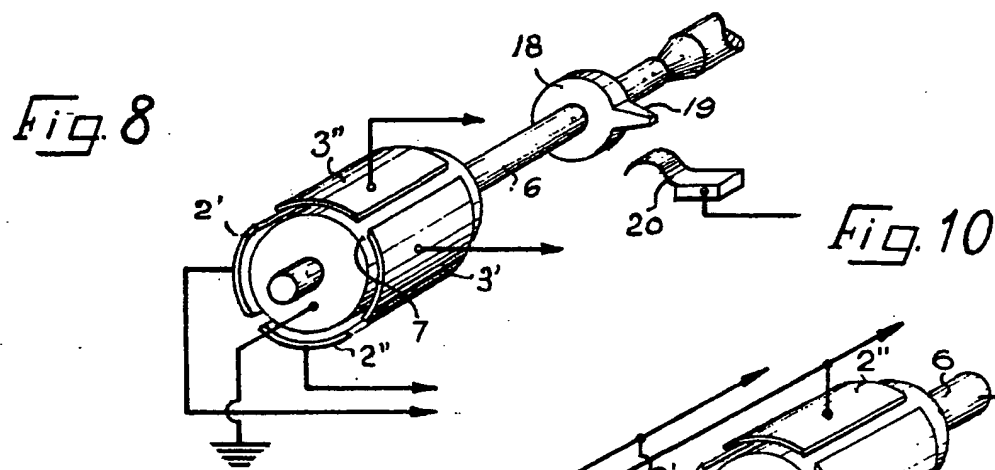
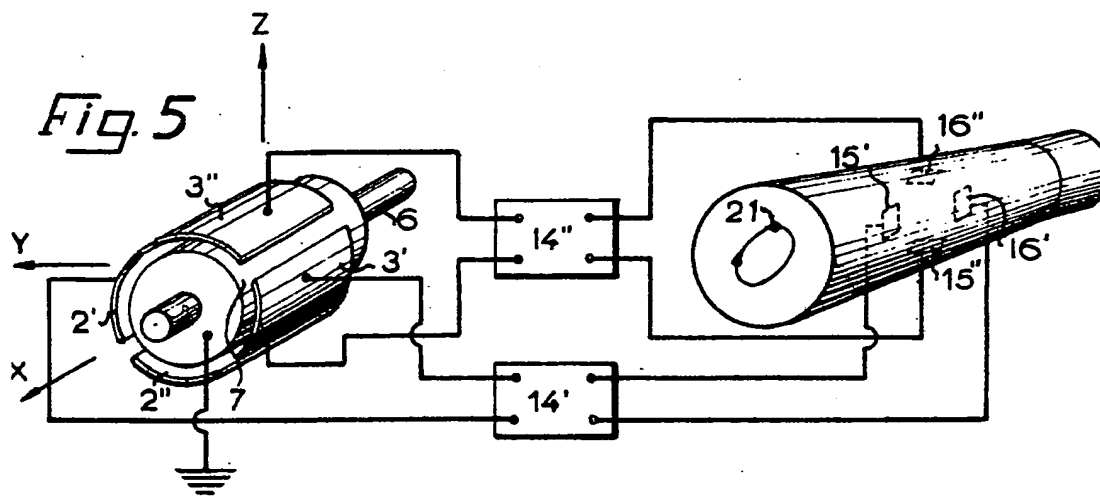
In Betracht gezogene Druckschriften:

Archiv für technisches Messen, I 86-3, Lieferung 221 vom Juni 1954;

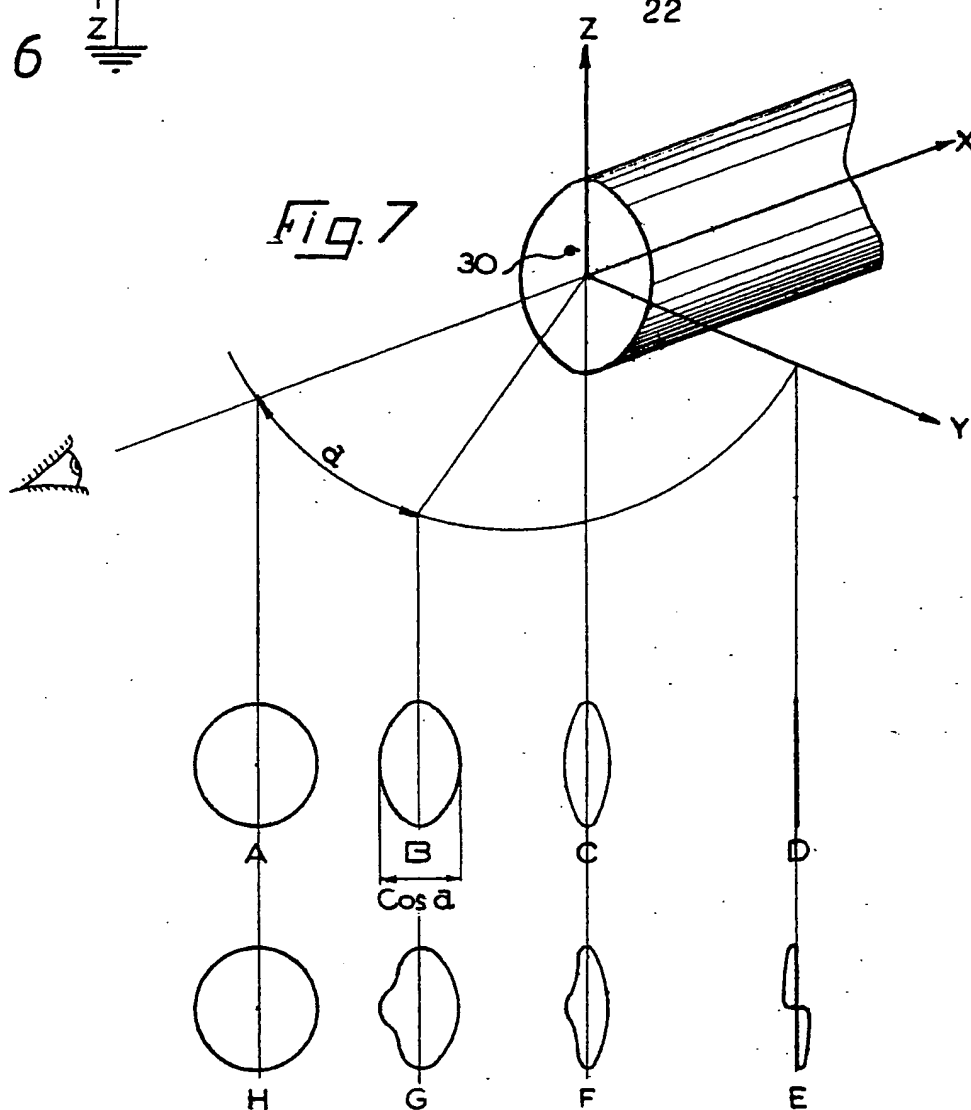
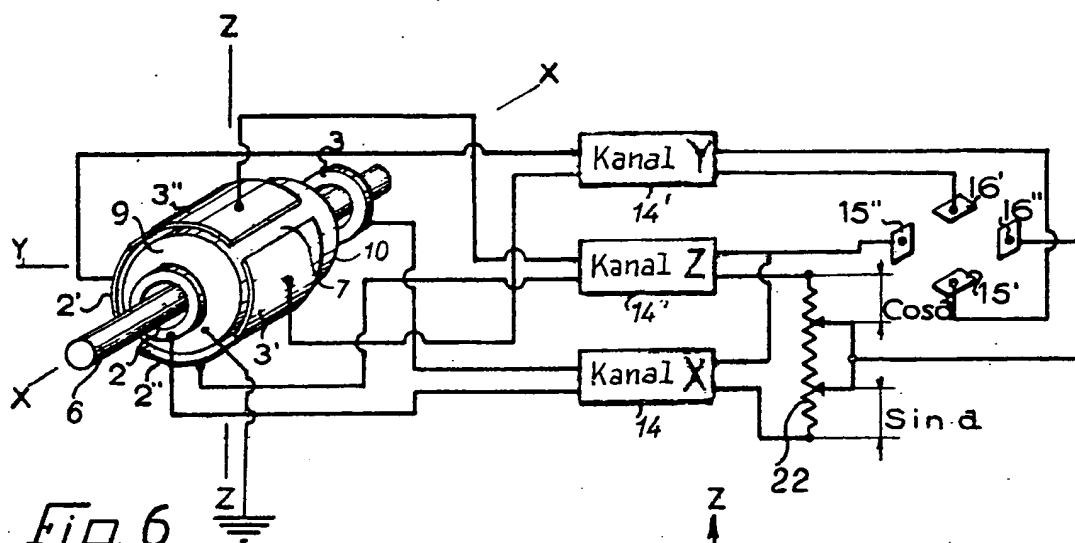
P. M. Pflüger, »Elektrische Messung mechanischer Größen«, 3. Auflage, 1948, S. 61 bis 68.

Hierzu 2 Blatt Zeichnungen









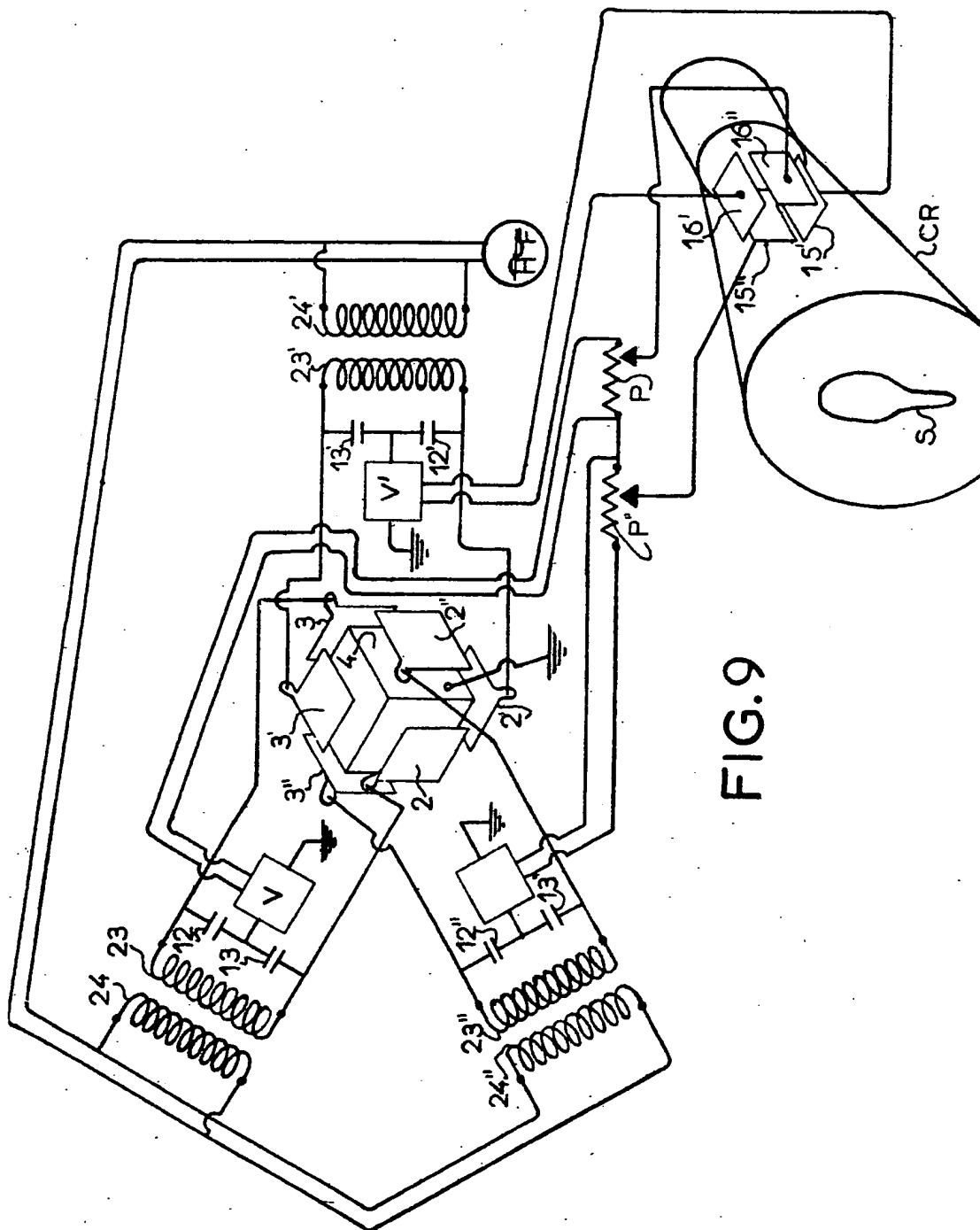


FIG.9